

Н.А. ЛЕЛЮК, аспирант

В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук

МОДЕЛИ КОНТАКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВИБРАЦИИ

Приведено огляд відомих моделей контактів при дослідженні процесу вібрації в електричному апараті.

Приведен обзор известных моделей контактов при исследовании процесса вибрации в электрическом аппарате.

Введение. Срок службы электрических аппаратов (ЭА) зависит от процессов на его контактах. Одним из основных процессов, определяющих долговечность работы ЭА, является вибрация на контактах, возникающая при нормальной работе и вызывающая отброс контактов. Этот отброс контактов крайне нежелателен, так как вызывает повторное появление электрической дуги и увеличивает износ контактов [1].

Причинами, вызывающими вибрацию контактов, являются:

- упругий удар при замыкании и размыкании контактов;
- колебания держателя контакта после удара;
- ударные реакции в осях;
- вибрация деталей;
- внешние вибрации: удары, тряски, толчки.

Эти причины приводят к нарушению нормального функционирования ЭА, в частности, к поломке или чрезмерному износу одной или нескольких его деталей.

Одной из нерешенных задач является моделирование процессов вибрации системы элементов ЭА и трехмерных вибраций контактных поверхностей. Вибрация элементов и контактов существенно влияет на основные показатели износостойкости ЭА. Устранение или снижение действия вибрации на контактах до прекращения отбросов контактов и получения колебаний без разрыва контактов [1] могут существенно повысить надежность работы, срок службы и энергосбережение ЭА.

Вибрационные процессы основаны на преобразовании и передаче энергии. Эти процессы сопровождаются распределением, поглощением и рассеянием энергии. В настоящее время эти процессы исследованы недостаточно ввиду их сложности. Большая часть исследований вибрации контактов ЭА ограничивается одномерными моделями процесса, когда движение подвижного контакта в процессе вибрации происходит в направлении одной из конструктивных осей ЭА. Решение задач анализа, синтеза и оптимизации виб-

рационных процессов требует применения более сложных моделей. В связи с резким расширением применения ЭВМ в последнее время появились мощные пакеты программ расчета различных сложных процессов, основанные на теории множеств, топологии, теории графов, матричных и операторных методов [2]. Это открывает возможность создания и решения трехмерных моделей ЭА и исследования процесса вибрации их контактов и узлов с использованием математического моделирования.

Цель работы – обзор методов моделирования вибрации контактов и перспективы их развития.

Известные модели контактов при исследовании процесса вибрации.

К наиболее известным моделям относятся: "упругая", "упруговязкая" и "упруговязкопластическая" модели контактов при исследовании их вибрации.

"Упругая" модель применяется при условии, что соударение контактов происходит мгновенно. После соприкосновения скорость подвижного контакта изменяется скачком. Величина скорости зависит от коэффициента восстановления контактного материала [3, 4]. В известных публикациях система координат, в которой рассматривается движение контактов при вибрации, принимается одноосной (одномерной).

На рис. 1 показана схема движения контактов для рассматриваемой модели контактов при вибрации.

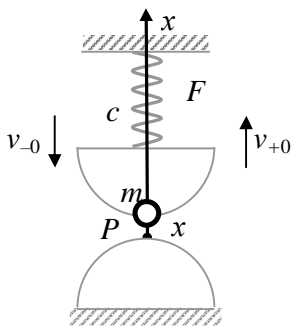


Рис. 1. Схема движения подвижного контакта в процессе вибрации, принятая для "упругой модели"

Контакты рассматриваются сферической формы, что обеспечивает переход к одноточечному контактированию. Подвижный контакт рассматривается как материальная точка, обозначенная на рис. 1 точкой P . Фактически процесс вибрации сводится к колебаниям материальной точки, подвешенной на пружине. Уравнения одномерного движения материальной точки P относительно неподвижного контакта и начальные условия, характеризующие "упругую" модель, имеют вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -(F + cx); \quad (1)$$

$$v_{+0} = -a \cdot v_{-0},$$

где m – масса подвижного контакта; $x = x(t)$ – расстояние между подвижным и неподвижным контактами, характеризующее отброс подвижного контакта от неподвижного; t – время процесса вибрации: $t < 0$ – интервал времени до начала вибрации; $t = 0$ – момент начала процесса вибрации контактов; F – сила нажатия пружины в момент соударения контактов; c – жесткость пружины; $v(t) = dx(t)/dt$ – мгновенная скорость подвижного контакта, $v(t < 0) = v_{-0}$, $v(t = 0) = v_{+0}$ – скорости подвижного контакта до и в момент начала вибрации; a – коэффициент восстановления контактного материала.

"Упруговязкая" модель, в отличие от "упругой" модели, учитывает деформацию контактов при соударении в процессе вибрации. Время соударения принимается не мгновенным, а отличным от нуля. Процесс вибрации включает интервал времени деформации, в течение которого части объемов контактов подвергаются упругой деформации. Возникающая сила упругой деформации препятствует сближению контактов после соприкосновения. В некоторый момент времени сближение контактов прекращается и под действием этой силы они расходятся.

На рис. 2 показана схема контактов для рассматриваемой модели вибрации в момент соприкосновения контактов. Введенная в схему вторая пружина обеспечивает учет упругой деформации. Объемы контактов, подверженные упругой деформации, выделены серым цветом.

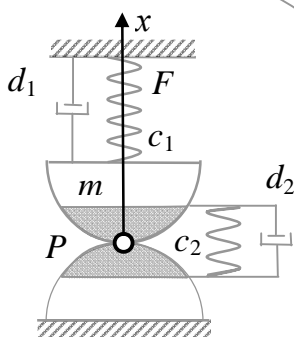


Рис. 2. Схема движения подвижного контакта в процессе вибрации, принятая для "упруговязкой" модели

Как и в предыдущем случае, математическое описание процесса вибрации строится исходя из предположения, что движется материальная точка P , а для учета упругой деформации вводятся дополнительные сосредоточенные

элементы модели, учитывающие свойства обоих контактов.

"Упруговязкая" модель, по аналогии с "упругой" моделью, представляется уравнением одномерного движения подвижного контакта (точки P) с учетом демпфирующих свойств пружины и контактов, начальными условиями, характеризующими отброс и скорость подвижного контакта в начальный момент времени $t = 0$ процесса вибрации и соотношением, связывающим начальную скорость подвижного контакта со скоростью этого контакта до начала вибрации:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b_1 \frac{dx}{dt} + c_1 x + \left(b_2 \frac{dx}{dt} + c_2 x \right) \eta(x) = -F ; \quad (2)$$

$$x(0) = 0 ;$$

$$v(0) = v_{+0} ;$$

$$v_{+0} = -a \cdot v_{-0} .$$

В дополнение к обозначениям модели (1), в модели (2) использованы следующие: b_1 , b_2 – параметры, характеризующие свойства демпфирующих элементов, соответственно пружины и контактов; c_1 , c_2 – жесткость пружины и контактов, ($c_1 = c$); $\eta(x)$ – единичная функция, равная 1 при $x > 0$ (контакты сомкнуты и деформируются), и 0 при $x < 0$ (контакты разомкнуты вследствие отброса). Решения системы (2) приведено в [3].

"Упруговязкопластическая" модель учитывает, кроме упругих, и пластические деформации контактов при вибрации. В первом приближении предполагается, что объемы контактов подвергаются не только упругой, но и пластической деформации. На рис. 3. приведена схема контактов в момент их соприкосновения, причем объемы, подвергающиеся упругой и пластической деформации, приняты одинаковыми и заштрихованы.

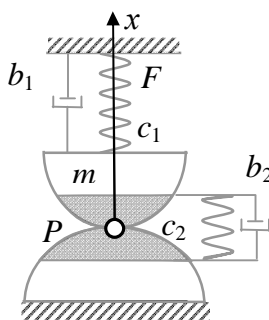


Рис. 3. Схема движения подвижного контакта в процессе вибрации, принятая для "упруговязкопластической" модели

Вследствие одинаковых схем на рис. 2 и рис. 3, математическое описание "упруговязкопластической" модели по форме совпадает с (2). Отличие заключается в способе определения параметров b_1 и b_2 . При их определении

учитываются коэффициенты не только упругих, но и пластических деформаций контактов [3].

Дальнейшее развитие последней модели связано с учетом радиусов кривизны контактов. Результаты расчета получаются более точными, чем по двум предыдущим моделям, однако, расчет весьма сложен и может быть выполнен лишь с помощью ЭВМ [3].

Полюсные графы для вибрационных систем. Для описания процесса вибрации контактов в [4] применяются схемы замещения с сосредоточенными компонентами – вибрационные схемы замещения. Уравнения модели в этом случае формируются на основе теории полюсных графов [5, 6]. Для упрощения модели вибрации контактов в качестве компонентов схемы используются двухполюсники. Алгоритм операций составления графа включает составление вибрационной схемы замещения, построение вибрационной цепи и построение графа.

На рис. 4 в качестве примера приведена вибрационная схема замещения контактов. В отличие от схем, приведенных на рис. 1-3, в этой схеме предусмотрена возможность исследования вибрации контактов в случае, когда оба контакта подвергаются не только действию упругих и пластических деформаций, но и могут перемещаться одновременно.

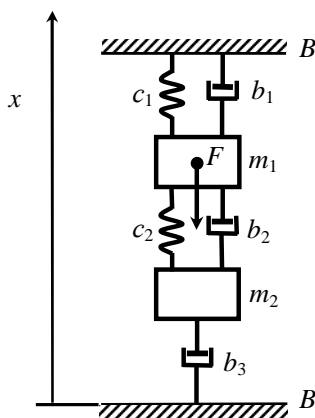


Рис. 4. Вибрационная схема замещения пары одноточечных контактов

Схема замещения построена по правилам, приведенным в [2]. Неподвижная база системы, относительно которой происходят движения контактов при вибрации, на схеме обозначена B . Подвижный и неподвижный контакты представлены инерционными элементами (массами) соответственно m_1 и m_2 . Для учета поглощения энергии вибрации контактов в схему введены демпфирующие элементы b_1 , b_2 и b_3 . Демпфирующие элементы b_1 и b_3 соединяют инерционные элементы – массы m_1 и m_2 – с базой B и между собой – b_2 . Упругие свойства контактов учитываются в схеме элементами упругости (пру-

жинами) c_1 и c_2 . На схеме эти упругие элементы подключены параллельно демпфирующим элементам. Сила, под действием которой происходит процесс вибрации, обозначена F . В рассматриваемом случае схема составлена для одномерной вибрации, вдоль оси x .

Анализ показывает, что данная схема является обобщением всех трех предыдущих схем движения контактов при вибрации, так как содержит все элементы предыдущих схем.

Вибрационная цепь строится по аналогии с электрической цепью. Как и электрическая цепь, она служит для упрощения описания динамических свойств реального объекта. Для вибрационной схемы замещения на рис. 5 показана вибрационная цепь.

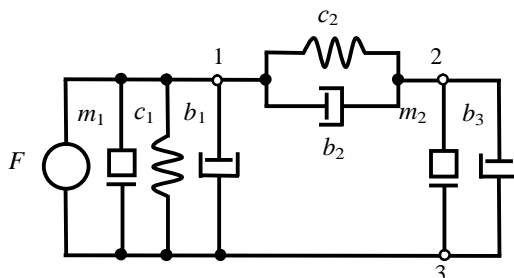


Рис. 5. Вибрационная цепь

Полусный граф является универсальной топологической моделью физической системы с сосредоточенными компонентами. Для механических поступательных систем используются идеальные пассивные двухполюсники: масса m , механическое сопротивление b , упругость c и идеальные активные двухполюсники – скорость v либо перемещение x (продольные переменные) и сила F (поперечная переменная).

На рис. 6 приведен граф вибрационной цепи (рис. 4).

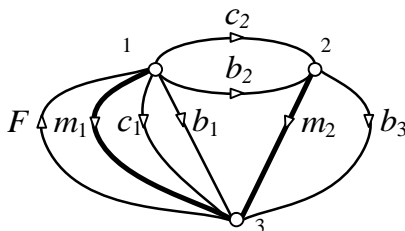


Рис. 6. Граф вибрационной схемы замещения

Число узлов графа $p = 3$, и их нумерация 1- одинакова для схемы и цепи. Число ветвей графа $f = 8$, а их обозначения соответствуют элементам вибрационной цепи. В качестве активного компонента графа используется источ-

ник силы F . Направление дуг пассивных двухполюсников принимаются в соответствии с выбранной системой отсчета (противоположно направлению оси перемещения x), а ориентация дуг активных двухполюсников – видом источника: для источников силы они совпадают, а для источников скорости – противоположны.

На основе графа формируются компонентные и топологические уравнения по известным правилам теории графов [5, 6]. После преобразований можно получить общее уравнение, соответствующее первому уравнению модели (2), в котором коэффициенты m , c_1 , c_2 , b_1 , b_2 выражаются через параметры компонент графа.

Развитие метода полюсных графов для двумерных и трехмерных вибраций контактов. Построенный граф является односвязным. В первую очередь это связано с тем, что рассматриваемые модели вибрации контактов являются одномерными.

Для перехода к двух- и трехмерным моделям можно воспользоваться следующими допущениями:

- активные двухполюсники графа вибрационной схемы замещения (силы, перемещения, скорости) являются векторными величинами;
- пассивные двухполюсники (демпфирующие и упругие) являются псевдовекторами, составляющие которых зависят от пространственного направления;
- инерционные элементы графа рассматриваются как скаляры.

Используя эти допущения, можно построить граф вибрационной схемы замещения для двух- и трехмерных вибраций контактов. Этот граф представляет собой три несвязных части для соответствующих пространственных направлений, причем каждая часть по виду не отличается от графа на рис. 7.

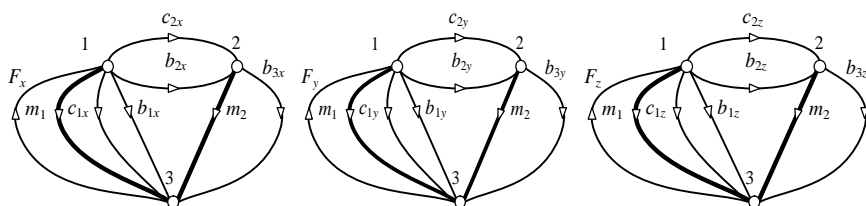


Рис. 7. Граф схемы для трехмерной вибрации

Основные отличия – обозначения элементов, получаемые заменами (цифровые индексы сохраняются и для простоты опущены):

$$F \rightarrow \mathbf{F} = \mathbf{F}(F_x, F_y, F_z); \quad (3)$$

$$b \rightarrow \mathbf{b} = \mathbf{b}(b_x, b_y, b_z);$$

$$c \rightarrow \mathbf{c} = \mathbf{c}(c_x, c_y, c_z),$$

где $\mathbf{F} = \mathbf{F}(F_x, F_y, F_z)$ – вектор силы с компонентами по осям координат x , y , z ; $\mathbf{b} = \mathbf{b}(b_x, b_y, b_z)$ и $\mathbf{c} = \mathbf{c}(c_x, c_y, c_z)$ – псевдовекторы, составляющие которых характеризуют величины механического сопротивления и упругости.

Обосновать такое представление графа в виде независимых частей можно на основе теории групп [7]. Векторные величины, характеризующие вибрацию, образуют группу. Некоторые ограничения накладываются на псевдовекторные величины, которые в общем случае могут быть и тензорными величинами. В основном это относится к пластическим деформациям. И этот вопрос требует отдельного исследования.

Преимущества такого подхода к исследованию трехмерных вибраций следующие. Во-первых, появляется возможность формализации операций по составлению модели процесса трехмерной вибрации контактной системы. Во-вторых, одна и та же, по сути, схема может быть получена на основе одномерной вибрации; различие величин компонент для составляющих частей графа (по разным осям) влияет только на числовые величины входных данных и, соответственно, результатов расчета. В-третьих, появляется возможность введения в модель дополнительных уточняющих параметров, которые не удастся учесть в предыдущих моделях, так как расширение списка параметров резко усложняет решение.

В качестве примера на рис. 7 показана схема для исследования вибрации контактов, когда оси контактов сдвинуты. Соударение контактов происходит под некоторым углом φ относительно оси движения контактов x . В этом случае имеет место двухмерная вибрация. Параметры графа имеют обозначения: F_x, F_y – компоненты вектора силы; m_1, m_2 – массы контактов (скалярные величины); b_1, b_2, b_3 – механические сопротивления (псевдовекторы, содержащие по две составляющие для осей x и y ; c_1, c_2 – упругости.

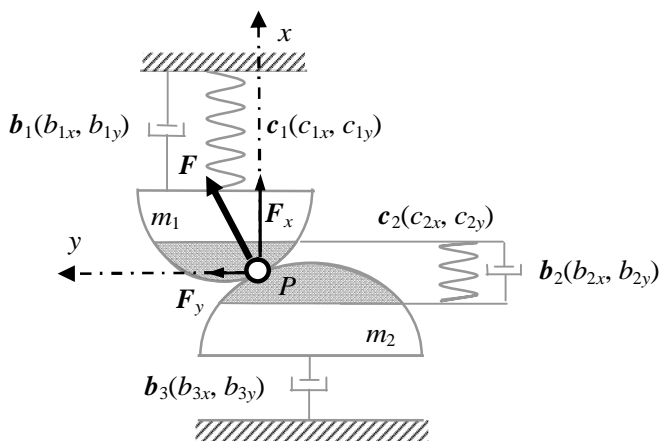


Рис. 8. Схема двухмерной вибрации контактов

На основе схемы рис. 8 может быть построен граф вибрационной цепи, содержащий две части, соответствующих первым двум частям графа на рис. 7 для осей x и y .

Таким образом, применение графов открывает возможность вводить в

схему дополнительные элементы, уточняющие модель контактов и рассматривать многомерную вибрацию. В приведенном примере введен дополнительный элемент – механическое сопротивление b_3 , который позволяет учесть влияние других частей электрического аппарата на вибрацию контактов. Кроме того, на схеме представлены параметры, характеризующие компоненты вектора силы и псевдовекторов механического сопротивления и упругих деформаций, которые используются при построении частей графа.

Список литературы: 1. *Шевченко С.М.* Движение и удары в электрических аппаратах автоматического управления. – М.: Энергия, 1979. – 144 с. 2. *Яковенко В.Б.* Моделирование и расчет вибрационных систем / Уч. пособие. – К.: УМК ВО, 1988. – 232 с. 3. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов / Н.М. Афанасьев, В.В. Афанасьев, В.В. Борисов и др.: Под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 384 с. 4. *Луников В.С., Лелюк Н.А.* Анализ математических моделей процесса вибрации контактов прямоходового электромагнита // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы международной науч. техн. конф., 17-19 октября 2007 г. – Томск: ТПУ. – 2007. – С. 67- 70. 5. *Сигорский В.П.* Математический аппарат инженера. – К.: Техніка, 1975. – 768 с. 6. *Ильинский Н.Ф., Цаценкин В.К.* Приложение теории графов к задачам электромеханики. – М.: Энергия, 1968. – 200с. 7. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

Поступила в редколлегию 18.10.07